

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Numéro de publication:

**0 392 945
A1**

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(21) Numéro de dépôt: 90420182.9

(51) Int. Cl.⁵: G01R 33/028

(22) Date de dépôt: 11.04.90

(30) Priorité: 14.04.89 FR 8905281

(43) Date de publication de la demande:
17.10.90 Bulletin 90/42(84) Etats contractants désignés:
CH DE FR GB IT LI(71) Demandeur: **SEXTANT Avionique**
5/7 rue Jeanne Braconnier Parc Tertiaire
F-92366 Meudon la Forêt Cedex(FR)(72) Inventeur: **Donzier, Eric**
9, Chemin des Allueges
F-74000 Annecy(FR)
Inventeur: **Thomas, Isabelle**
30, Rue Marius Villard
F-26000 Valence(FR)
Inventeur: **Spirkovitch, Serge**
68, Rue des Cévennes
F-75015 Paris(FR)
Inventeur: **Baillieu, François**
13, Rue des Vendangeurs
F-94440 Marolles en Brie(FR)(74) Mandataire: **de Beaumont, Michel**
1bis, rue Champollion
F-38000 Grenoble(FR)(54) **Micromagnétomètre à détection capacitive.**

(57) La présente invention concerne un micromagnétomètre à détection capacitive comprenant : deux couches minces conductrices (1, 3) superposées, séparées par une interface isolante (2), et formées sur un substrat isolant, au moins la couche supérieure étant gravée pour comprendre un segment de couche (4) rejoint à ses extrémités par deux bandes parallèles (6, 7) orthogonales à ce segment, ledit segment et une partie desdites bandes ainsi que les parties correspondantes de la couche inférieure étant situés au-dessus d'un évidement du substrat ; une surface conductrice (14) formée dans l'évidement du substrat, au moins en regard dudit segment ; des moyens de connexion électrique aux deux bandes pour y connecter une source de courant ; et des moyens de mesure des variations de capacité entre la couche mince inférieure et la surface conductrice.

EP 0 392 945 A1

MICROMAGNÉTOMÈTRE À DÉTECTION CAPACITIVE

La présente invention concerne un micromagnétomètre.

On a développé ces dernières années des micromagnétomètres réalisés par des techniques similaires aux techniques utilisées dans le domaine de la fabrication des circuits intégrés. Ces micromagnétomètres sont généralement constitués à partir d'une plaquette de silicium et d'une aile ou volet en silicium portant elle-même un bobinage. Quand un courant constant parcourt le bobinage et qu'un champ magnétique est appliqué perpendiculairement à une direction de passage du courant, la déflexion de l'aile ou volet constitue une mesure de l'intensité du champ magnétique. Si le courant électrique est un courant alternatif à la fréquence de résonance du système mécanique, l'amplitude de l'oscillation constitue une indication de la valeur du champ magnétique.

Les calculs montrent que plus l'aile vibrante est mince, plus la sensibilité du système est élevée.

Avec les systèmes de l'art antérieur tels qu'ils viennent d'être décrits, dans lesquels la partie vibrante est constituée d'une lamelle de silicium, il n'est pas possible de choisir librement les divers paramètres étant donné qu'il existe une limite inférieure à l'épaisseur que l'on peut conférer à une lamelle de silicium obtenue à partir d'une plaquette de silicium. A titre d'exemple, les plaquettes de silicium sont couramment disponibles dans des épaisseurs de 0,3 à 0,5 mm et l'on arrive à les amincir pour obtenir des ailes ou volets d'une épaisseur de l'ordre de 10 à 15 micromètres. En dessous de ces valeurs, il devient en effet difficile de contrôler avec précision l'épaisseur finale.

En raison de cette contrainte sur les épaisseurs minimales, le concepteur d'un micromagnétomètre n'est pas complètement libre de sélectionner indépendamment divers paramètres tels que les dimensions à choisir pour l'aile vibrante (l'envergure de celle-ci est inévitablement relativement importante et le dispositif occupera une certaine surface de silicium), la fréquence de résonance, etc. En particulier, on est amené à choisir des systèmes qui résonnent à des fréquences de l'ordre de la dizaine de kilohertz, ce qui n'est pas satisfaisant pour permettre de s'affranchir autant que possible des vibrations mécaniques parasites. En outre, les dimensions de l'aile empêchent de s'affranchir totalement des perturbations liées aux accélérations auxquelles pourrait être soumis le système.

Ainsi, un objet de la présente invention est de prévoir un nouveau type de micromagnétomètre.

Un autre objet de la présente invention est de prévoir un tel micromagnétomètre dans lequel la

partie vibrante soit aussi fine et légère que possible.

Un autre objet de la présente invention est de prévoir un tel micromagnétomètre dans lequel la partie vibrante occupe une surface aussi faible que possible.

Ces objets de la présente invention sont atteints en prévoyant un micromagnétomètre à détection capacitive comprenant :

- deux couches minces conductrices superposées, séparées par une interface isolante, et formées sur un substrat isolant, au moins la couche supérieure étant gravée pour comprendre un segment de couche rejoint à ses extrémités par deux bandes parallèles orthogonales à ce segment, ledit segment et une partie desdites bandes ainsi que les parties correspondantes de la couche inférieure étant situés au-dessus d'un évidement du substrat ;
- une surface conductrice formée dans l'évidement du substrat, au moins en regard dudit segment ;
- des moyens de connexion électrique aux deux bandes pour y connecter une source de courant ; et
- des moyens de mesure des variations de capacité entre la couche mince inférieure et la surface conductrice.

Un procédé pour fabriquer un micromagnétomètre selon l'invention comprend les étapes suivantes :

- prévoir un substrat à surface supérieure isolante comprenant au moins une région conductrice ;
- former, en particulier au-dessus de la région conductrice, une portion de couche d'un produit sélectivement attaquable par rapport aux surfaces apparentes du substrat ;
- former au-dessus du substrat et de ladite portion de couche un sandwich comprenant :
 - une première couche conductrice,
 - une couche isolante,
 - une deuxième couche conductrice ;
- graver ledit sandwich pour en laisser en place une première partie sur le substrat et une deuxième partie sur ladite portion de couche, cette deuxième partie étant conformée pour permettre le passage d'un courant dans la couche supérieure dans une direction principale orthogonale au champ à détecter ; et
- éliminer par attaque sélective ladite portion de couche, d'où il résulte que la deuxième partie se trouve en surplomb au-dessus de ladite région conductrice

Selon un mode de réalisation de la présente invention, les couches conductrices sont des couches d'aluminium et la couche d'isolement est une couche d'alumine ; le substrat est une plaquette de

silicium revêtue d'oxyde de silicium ; et la région conductrice est une portion de couche de silicium polycristallin dopé.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, le produit sélectivement attaquable est du silicium polycristallin ou une couche de résine.

Ainsi, un micromagnétomètre selon l'invention présente une structure d'aile vibrante particulièrement légère puisqu'elle comprend seulement deux couches minces de métallisation, par exemple un sandwich constitué de deux couches d'aluminium séparées d'une couche d'alumine. Cette structure vibrante extrêmement légère aura une fréquence de vibration élevée qui pourra, comme cela sera indiqué ci-après, être choisie par le concepteur. Celui-ci pourra notamment sélectionner la dimension de l'aile vibrante, ou le métal en constituant les diverses couches conductrices. Si on compare un micromagnétomètre selon la présente invention à un micromagnétomètre à ailes en silicium selon l'art antérieur, on notera que le micromagnétomètre selon la présente invention présentera un coefficient de qualité Q plus important, c'est-à-dire une plus forte sensibilité.

Ces objets, caractéristiques et avantages ainsi que d'autres de la présente invention seront exposés plus en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

la figure 1 est une vue en coupe très schématique d'une structure selon la présente invention ;

la figure 2 est une vue en perspective schématique, correspondant à la figure 1 ;

les figures 3A et 3B sont des vues en coupe transversale et longitudinale d'une structure selon la présente invention ;

les figures 4A, 4B et 4C illustrent très schématiquement un aspect du procédé selon la présente invention ; et

la figure 5 représente à titre d'exemple et partiellement sous forme de blocs le schéma électrique d'ensemble d'un détecteur selon la présente invention.

Le principe d'un micromagnétomètre selon la présente invention va d'abord être exposé en relation avec la vue en coupe de la figure 1 et la vue en perspective de la figure 2 qui illustrent de façon très schématique certains aspects de la présente invention.

Selon la présente invention, il est prévu une poutre constituée d'un sandwich comprenant une première couche conductrice 1, une couche isolante 2 et une deuxième couche conductrice 3. Une première partie du sandwich repose sur un substrat et une deuxième partie constituant la poutre est en surplomb par rapport à ce substrat. Comme le représente mieux la figure 2, la deuxième partie

comprend, du moins en ce qui concerne la couche supérieure 3, un segment 4 orienté selon une première direction sensiblement parallèle à la limite 5 du substrat au delà de laquelle cette deuxième partie se trouve en surplomb. Ce segment 4 est solidaire de deux bandes 6 et 7 qui lui sont orthogonales et qui se prolongent sur le substrat. En d'autres termes, la bande 6, le segment 4 et la bande 7 constituent une portion d'une spire électrique permettant de faire passer dans le segment 4 un courant électrique de valeur choisie, par exemple un courant alternatif. Ainsi, en fonction de l'intensité d'un champ magnétique B orienté perpendiculairement à la direction principale du segment 4, la poutre constituée par la partie en surplomb se défléchira plus ou moins si le courant est continu ou oscillera plus ou moins si le courant est alternatif (par exemple à la fréquence de résonance mécanique de la poutre).

Dans l'exemple de la figure 1, le substrat est constitué d'une plaquette de silicium 10 revêtue d'une première couche d'oxyde de silicium 11 elle-même revêtue d'une deuxième couche de silicium 12 constituant une marche au-delà de laquelle la deuxième partie du sandwich 1, 2, 3 se trouve en surplomb. Pour détecter les déflexions ou les vibrations du segment 4, une portion de couche conductrice 14 est disposée sensiblement en regard du segment 4 et, de façon classique, on détecte la variation de capacité entre la partie de la couche 1 du segment 4 et la portion couche 14, cette capacité étant caractéristique de la distance et des variations de distance entre ces éléments.

Les figures 3A et 3B représentent, de façon plus précise quoiqu'encore très schématiquement, des vues en coupe selon les plans A-A et B-B de la figure 2 et sont destinées à illustrer à titre d'exemple un mode de fabrication d'un capteur selon la présente invention.

On notera que dans ces figures, comme d'ailleurs dans les autres figures, les épaisseurs et dimensions latérales des diverses couches ne sont pas tracées à l'échelle mais, comme cela est classique dans le domaine des circuits intégrés sont arbitrairement dilatées ou réduites pour améliorer la lisibilité des figures. Pour les dimensions de ces diverses couches, on se référera aux usages de la technique à moins que des valeurs particulières ne soient indiquées dans le texte ci-après.

Pour fabriquer une structure telle que celle illustrée en figures 3A et 3B, on part d'un substrat de silicium 10 sur lequel est formé, par oxydation thermique et/ou par dépôt chimique en phase vapeur une couche d'oxyde de silicium 11. Une couche de silicium polycristallin 14, fortement dopée pour être conductrice, est déposée et gravée pour se trouver en face du segment oscillant à former ultérieurement. L'ensemble de la surface et notam-

ment, la partie supérieure de la couche de silicium polycristallin est revêtue d'une couche isolante, par exemple de l'oxyde de silicium 21. Sur cette couche est formée une couche de silicium polycristallin 22 qui est gravée pour se trouver notamment en dessous de la deuxième partie du sandwich ci-dessus mentionnée dont on veut qu'elle se trouve en surplomb. Ensuite, sont successivement formées une première couche d'aluminium 1 (par exemple par évaporation sous vide), une couche isolante d'alumine 2 (par exemple par oxydation thermique), et une deuxième couche d'aluminium 3 (à nouveau par évaporation sous vide). Le sandwich constitué par les trois couches 1, 2 et 3 est gravé selon le motif souhaité, par exemple conformément à la représentation de la figure 2. Après cela, la couche 22 de silicium polycristallin est éliminée par une attaque sélective par rapport à l'oxyde de silicium, à l'aluminium et à l'alumine et l'on arrive à la structure illustrée.

Bien entendu, la succession d'étapes décrite précédemment ne constitue qu'un exemple des nombreux procédés possibles de réalisation de la structure selon l'invention. En particulier, on pourra prévoir diverses étapes de planarisation pour que la surface supérieure de la couche 21 soit plane et pour que la surface supérieure de la couche de silicium polycristallin 22 se prolonge au même niveau par une surface d'oxyde de façon que la surface supérieure de la poutre soit plane, comme cela a été représenté en figure 1. On pourra ainsi prévoir sous les couches 1, 2 et 3 un conducteur destiné à compenser le champ à mesurer et faisant partie intégrante du micromagnétomètre.

D'autre part, de nombreuses variantes sont possibles quant aux matériaux utilisés. Alors que le silicium et l'oxyde de silicium sont les matériaux les plus couramment disponibles aujourd'hui, d'autres matériaux analogues pourront être utilisés. En outre, au lieu du silicium polycristallin dopé de la couche 14, tout autre matériau conducteur compatible avec le procédé de fabrication pourra être utilisé. De même, au lieu de deux couches d'aluminium 1 et 3, on pourra utiliser des couches d'autres métaux ou alliages métalliques, tels que Ti ou Ti-Cu, du moment qu'elles aient une tenue suffisante pour permettre leur formation en surplomb et une conduction électrique satisfaisante pour laisser passer le courant i destiné à interagir avec le champ électrique B pour fournir un déplacement en raison de la force de Laplace.

La raison essentielle pour laquelle on préfère actuellement utiliser comme substrat un substrat de silicium apparaît dans la partie droite de la figure 3B. En effet, le procédé décrit précédemment est compatible avec la fabrication simultanée de transistors MOS dans la plaquette de silicium 10. Comme le notera l'homme de l'art, la grille 25

d'un tel transistor MOS pourra être formée à la même étape que la plaque conductrice 14.

En outre, bien que cela ne soit pas représenté dans les diverses figures par souci de simplification, il sera clair que les diverses couches conductrices se prolongent vers d'autres couches ou vers des plots pour assurer les connexions nécessaires, une des étapes de fabrication finale consistant à réaliser des contacts avec les plots mentionnés.

Les figures 4A, 4B, 4C illustrent de façon générale la formation d'une poutre en surplomb selon l'invention. Comme le représente la figure 4A, sur un substrat 30 est formée une couche 31 d'un produit sélectivement attaquant, revêtue de couches minces 32 du ou des matériaux dont on veut constituer, la poutre. Ensuite, pendant l'étape illustrée en figure 4B, la poutre est gravée selon la configuration souhaitée et enfin, comme cela est illustré à l'étape de la figure 4C, le produit sélectivement attaquant 32 est éliminé.

A titre de matériau sélectivement attaquant, on a suggéré précédemment l'emploi de silicium polycristallin. Il pourra être plus simple dans certaines applications de prévoir une couche de résine.

Si on désigne par l la longueur des bandes 6 et 7 orthogonales au segment 4 (voir figure 2), par L la largeur de ces bandes et la largeur du segment, par L_0 la longueur totale du segment 4, et par e l'épaisseur totale du sandwich comprenant les éléments 1, 2 et 3, on obtient avec une structure du type illustré en figure 2 où $e = 2 \mu\text{m}$:

- une fréquence de résonance de 160 kHz avec $L = 30 \mu\text{m}$, $l = 60 \mu\text{m}$, $L_0 = 120 \mu\text{m}$, (une accélération de 1 g correspondant à un champ magnétique de 1,5 nT, alors qu'elle correspondrait à 10^3 nT pour un micromagnétomètre comparable à aile vibrante en silicium) ;
- une fréquence de résonance de 1,4 MHz avec $L = 20 \mu\text{m}$, $l = 10 \mu\text{m}$, $L_0 = 40 \mu\text{m}$.

C'est un avantage de la présente invention, dû notamment à la faible masse de la poutre, que de pouvoir obtenir des fréquences de résonance aussi élevées qui permettant de s'affranchir des vibrations ou accélérations parasites existant couramment dans les systèmes mécaniques, et de diminuer le bruit inversement proportionnel à la fréquence du système électronique de détection.

En outre, et comme cela est souhaitable pour une bonne détectivité, le procédé de fabrication selon la présente invention permet d'obtenir une distance entre les deux plaques d'électrode 4 et 14 permettant de détecter des vibrations de la poutre selon l'invention de très faibles amplitudes. Si cette distance faible permet d'obtenir une capacité de valeur mesurable même pour de petites dimensions de la poutre selon l'invention, elle présente un inconvénient en ce que l'air inclus entre la poutre et la plaque d'électrode de substrat tend à

amortir les vibrations. Pour s'affranchir de cet effet, on montera de préférence une structure selon l'invention dans un capot mis sous vide.

La figure 5 illustre très schématiquement le montage d'un capteur selon la présente invention. Dans le schéma de la figure 5, la spire ou portion en segment de la couche supérieure 3 dans laquelle circule le courant i destiné à interagir avec le champ magnétique appliqué pour faire fléchir ou osciller la structure est désignée par la référence 40. La partie de la couche inférieure 1 du segment 4 constitue une première plaque, reliée à la masse, d'un condensateur 41 dont l'autre plaque correspond à la surface conductrice 14. Cette deuxième plaque est polarisée par une connexion à une source de tension VCC effectuée par l'intermédiaire de deux diodes tête-bêche 42 et 43. Cette deuxième plaque est également reliée à la grille d'un transistor MOS 44, normalement un transistor formé dans la même structure, comme cela est représenté dans la partie droite de la figure 3B. Le montage de polarisation à deux diodes tête-bêche permet de polariser la grille du transistor 44 à la valeur de la tension VCC.

Le signal de sortie amplifié par le transistor MOS 44 est encore amplifié par un amplificateur haute fréquence 45 agissant par l'intermédiaire d'un circuit d'asservissement 46 et d'un transistor MOS 47 connecté en série avec la spire 40 pour asservir le courant dans cette spire 40 à la fréquence de résonance de la poutre (valeur maximale du signal de sortie). En outre, on peut prévoir un conducteur de compensation 50 disposé par exemple sur le substrat précédemment décrit et qui est asservi par un démodulateur synchrone 51 et un circuit d'asservissement 48 pour maintenir à une valeur très faible l'oscillation du capteur selon l'invention et améliorer la linéarité des mesures.

Comme cela a été indiqué au cours de la description qui précède, la présente invention peut être soumise à de nombreuses variantes et perfectionnements qui apparaîtront à l'homme de l'art, notamment en ce qui concerne les matériaux utilisés. Divers procédés de fabrication pourront être choisis parmi les procédés classiques dans le domaine de la fabrication des circuits intégrés.

En outre, on pourra prévoir des variations de forme de la poutre vibrante. Par exemple, la couche conductrice inférieure qui sert de plaque de condensateur n'aura pas nécessairement la même découpe que la couche conductrice supérieure qui sert à laisser passer un courant interagissant avec un champ magnétique. On pourra aussi prévoir de charger la poutre, par un revêtement isolant, par exemple en SiO_2 . On pourra également coupler deux structures symétriques de façon à éliminer certains effets parasites.

Revendications

1. Micromagnétomètre à détection capacitive caractérisé en ce qu'il comprend :

- 5 - deux couches minces conductrices (1, 3) superposées, séparées par une interface isolante (2), et formées sur un substrat isolant, au moins la couche supérieure étant gravée pour comprendre un segment de couche (4) rejoint à ses extrémités par deux bandes parallèles (6, 7) orthogonales à ce segment, ledit segment et une partie desdites bandes ainsi que les parties correspondantes de la couche inférieure étant situés au-dessus d'un évidement du substrat ;
- 10 - une surface conductrice (14) formée dans l'évidement du substrat, au moins en regard dudit segment ;
- des moyens de connexion électrique aux deux bandes pour y connecter une source de courant ; et
- 20 - des moyens de mesure des variations de capacité entre la couche mince inférieure et la surface conductrice.

2. Micromagnétomètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que les couches minces ont des épaisseurs de l'ordre d'environ 0,1 à quelques micromètres, en ce que ledit segment a une longueur de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres, et en ce que les parties en surplomb desdites bandes ont des longueurs et largeurs de l'ordre de la dizaine de micromètres.

3. Procédé de fabrication d'un élément capteur de micromagnétomètre, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes consistant à :

- 35 - prévoir un substrat à surface supérieure isolante (10, 11, 21 ; 30) comprenant au moins une région conductrice (14) ;
- former, en particulier au-dessus de la région conductrice, une portion de couche (22 ; 31) d'un produit sélectivement attaquable par rapport aux surfaces apparentes du substrat ;
- former au-dessus du substrat et de ladite portion de couche un sandwich comprenant :
 - 45 . une première couche conductrice (1),
 - . une couche isolante (2),
 - . une deuxième couche conductrice (3) ;
- graver ledit sandwich pour en laisser en place une première partie sur le substrat et une deuxième partie sur ladite portion de couche, cette deuxième partie étant conformée pour permettre le passage d'un courant dans la couche supérieure dans une direction principale orthogonale au champ à détecter ; et
- 50 - éliminer par attaque sélective ladite portion de couche, d'où il résulte que la deuxième partie se trouve en surplomb au-dessus de ladite région conductrice

4. Procédé selon la revendication 4, caractérisé

en ce que lesdites couches conductrices sont des couches d'aluminium et la couche d'isolement est une couche d'alumine.

5. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que le substrat est une plaquette de silicium revêtue d'oxyde de silicium.

5

6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que la région conductrice est une portion de couche de silicium polycristallin dopé.

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que le produit sélectivement attaquable est du silicium polycristallin, la couche de silicium polycristallin selon la revendication 6 étant elle-même préalablement revêtue d'oxyde de silicium.

10

8. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la couche de produit sélectivement attaquable est une couche de résine.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

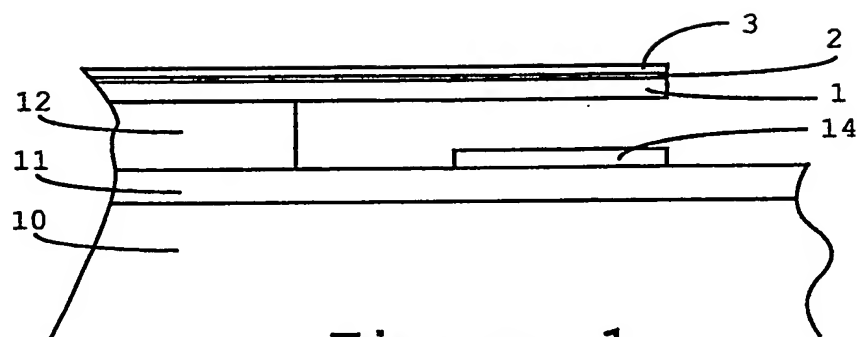


Figure 1

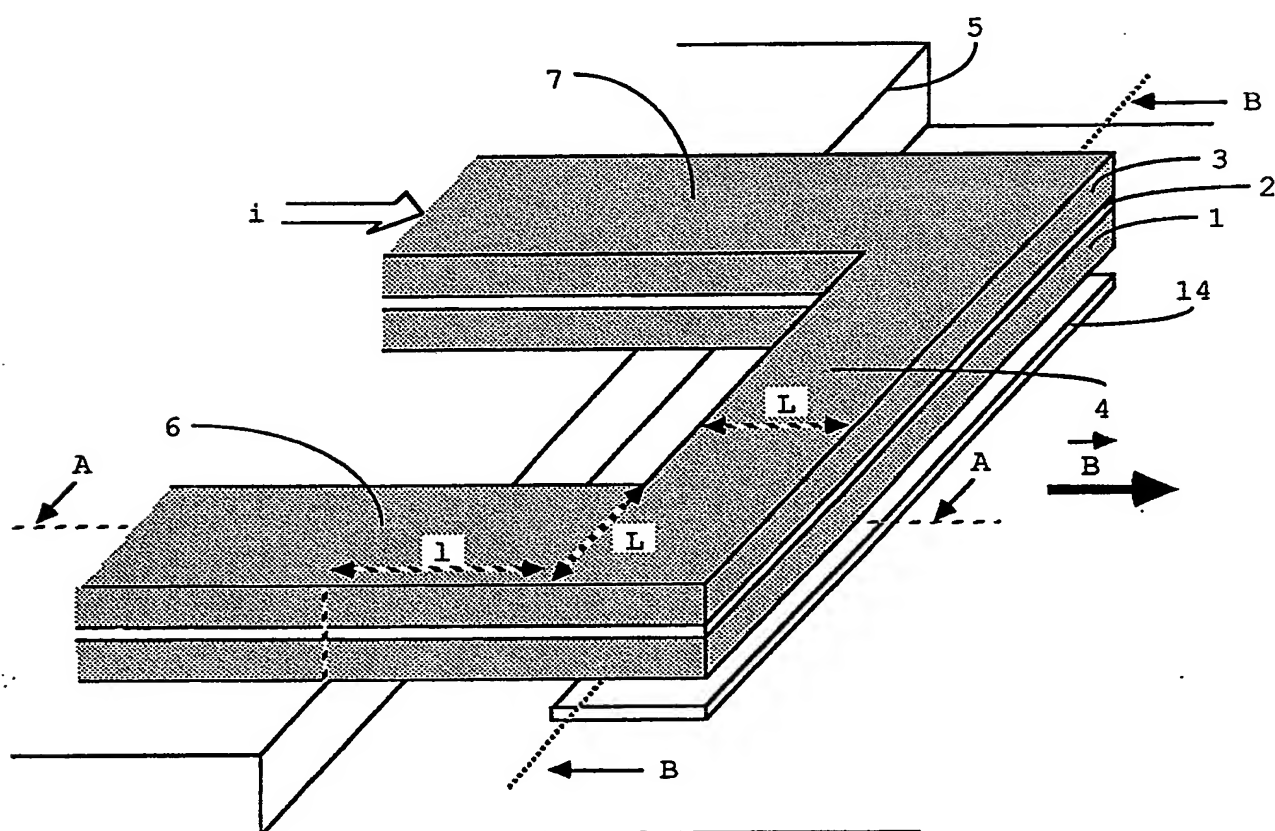


Figure 2

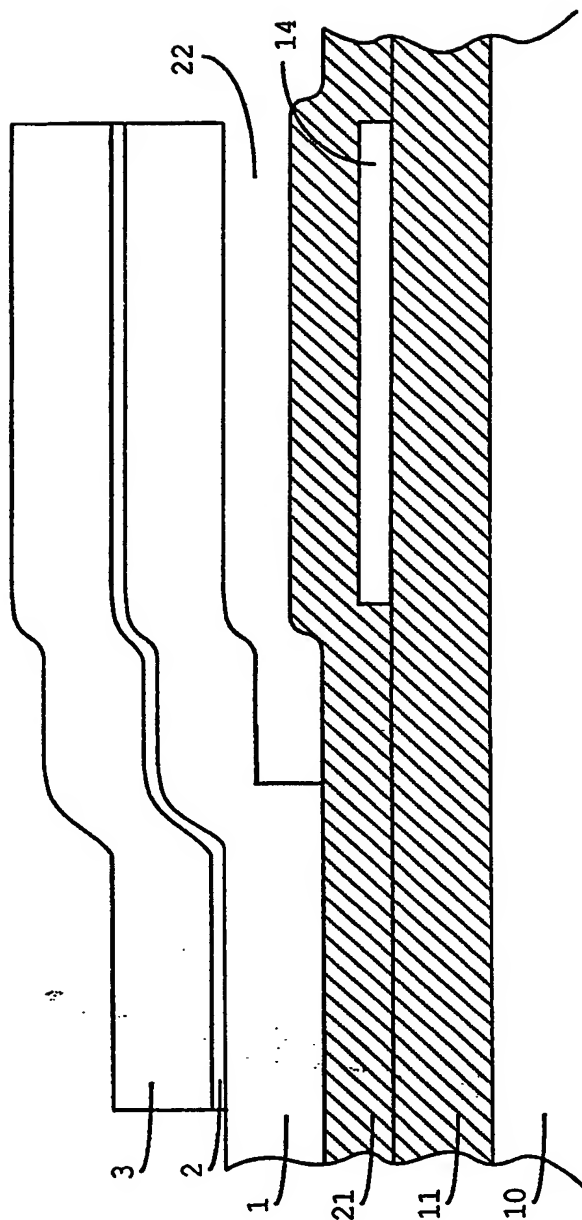


Figure 3A

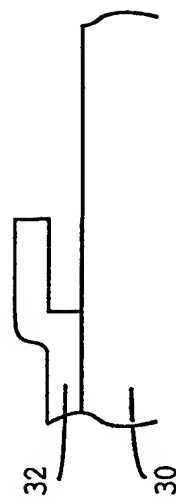


Figure 4C

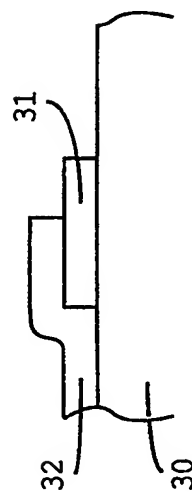


Figure 4B

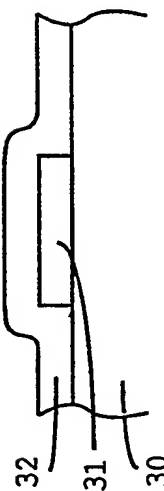


Figure 4A

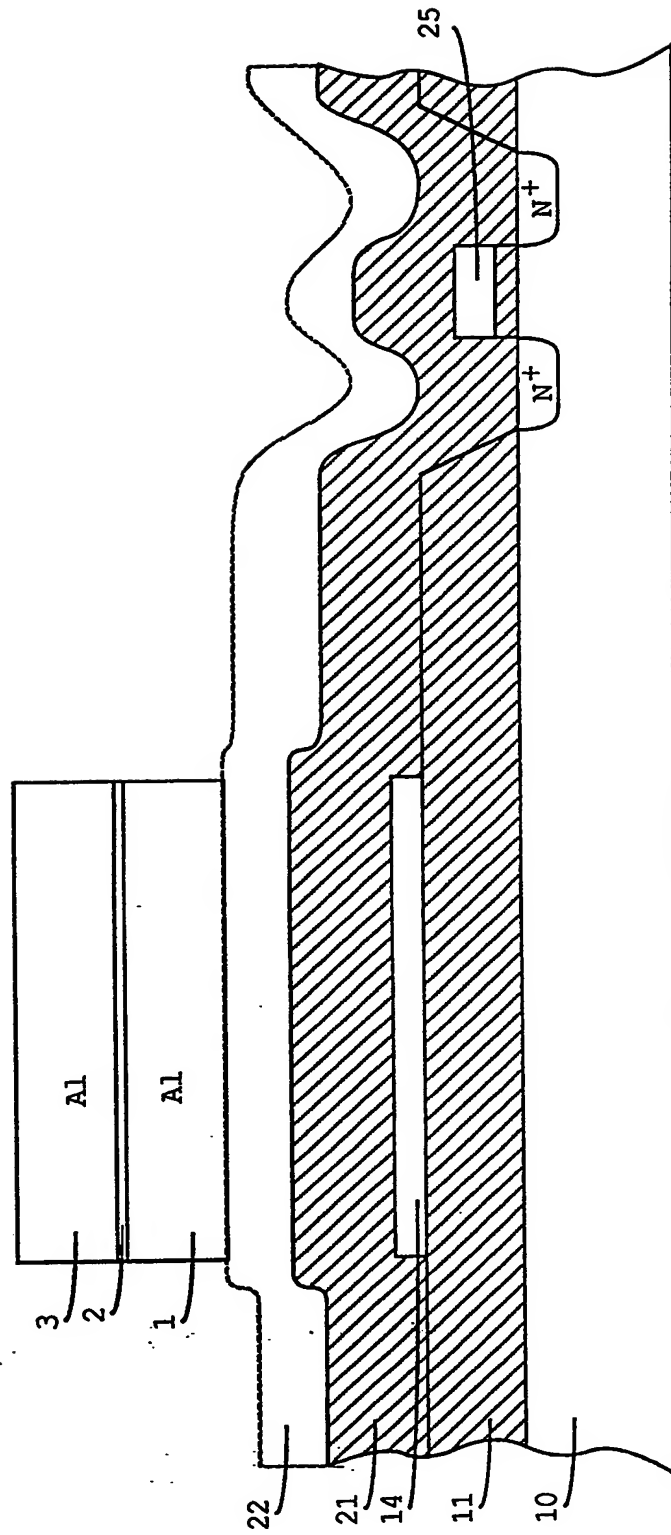


Figure 3B

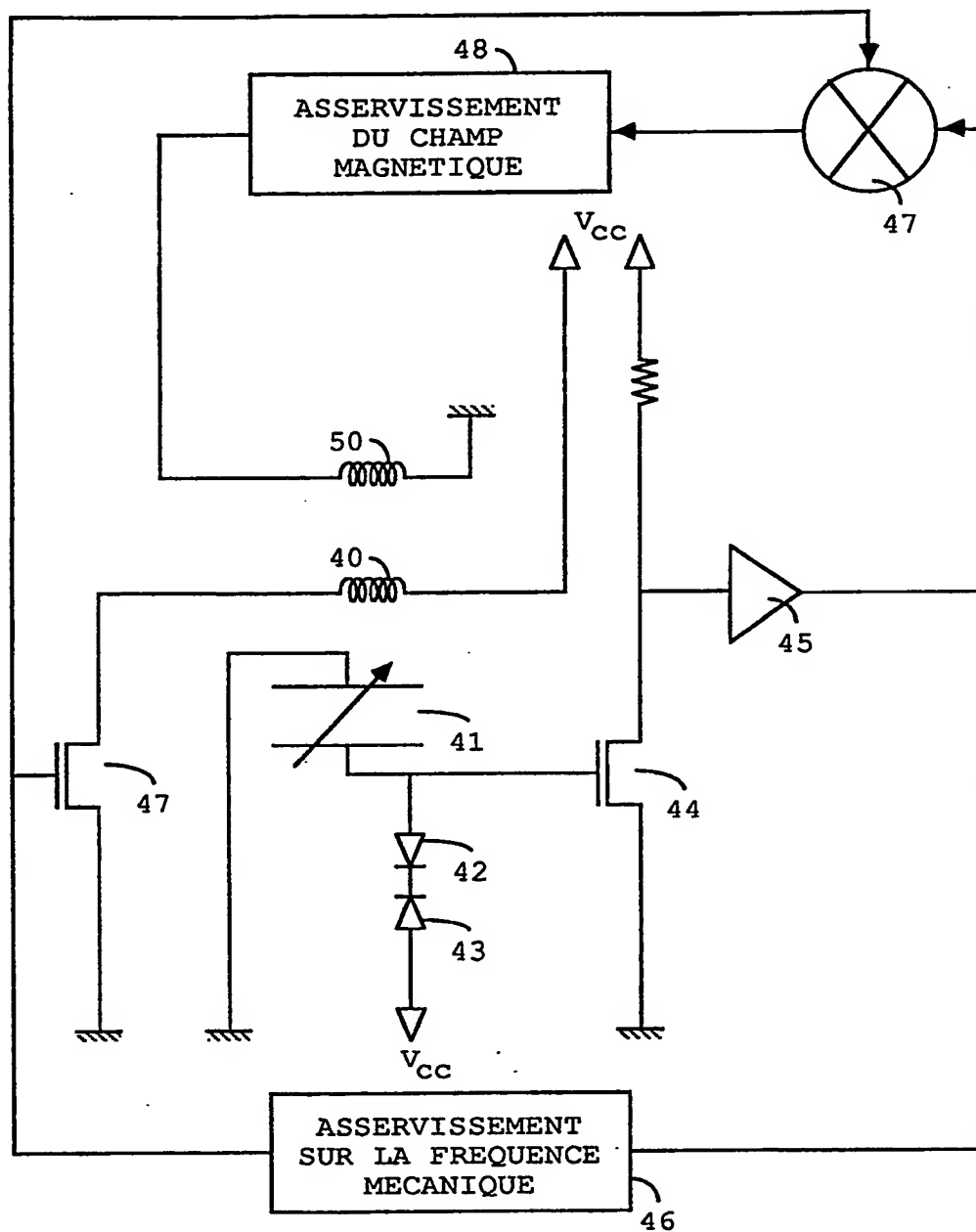


Figure 5



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande

EP 90 42 0182

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl.5)
X	GB-A-2136581 (CENTRE ELECTRONIQUE HORLOGER) * page 1, lignes 46 - 55 * * page 2, lignes 21 - 26 * * page 2, ligne 64 - page 3, ligne 12 * * figures 1, 5 *	1	G01R33/028
A	---	2, 4-7	
A	GB-A-1279091 (NEWPORT INSTRUMENTS LTD) * page 1, lignes 35 - 52 * -----	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
			G01R
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 20 JUILLET 1990	Examineur SWARTJES H.M.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande I : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

EP 0 392 945

10/572379

AP9 Rec'd PCT/PTO 16 MAR 2005

PATENTS ACTS - 1977

IN THE MATTER of a European
Patent (UK) in the name of

SEXTANT AVIONIQUE

I, Michel de BEAUMONT, 1bis, Rue Champollion, 38000 GRENOBLE, FRANCE
fully conversant with the English and French languages, hereby certify
that to the best of my knowledge and belief the following is a true
translation into the English language, which has been made by me and
for which I accept responsibility, of the specification of the European
Patent No : 0 392 945

Application No : 90420182.9

Signed this 25th day of January 1994



Michel de Beaumont

MICROMAGNETOMETER WITH CAPACITIVE DETECTION

The present invention relates to micromagnetometers.

Over the last years, micromagnetometers have been developed by using techniques similar to the techniques used in the field of integrated circuit manufacturing. Such micromagnetometers are generally formed from a silicon wafer and a silicon wing or flap, in turn supporting a coil. When a d.c. current flows through the coil and a magnetic field is applied perpendicularly to a direction of the current flow, the deflection of the wing or flap constitutes a measurement of the magnetic field strength. If the electric current is an a.c. current at the resonance frequency of the mechanical system, the oscillation magnitude is indicative of the value of the magnetic field. Such a micromagnetometer is for example described in GB-A-2,136,581.

Calculations show that the thinner the vibrating wing, the higher the sensitivity of the system.

With prior art systems, such as above described, in which the vibrating portion is formed by a thin silicon plate, it is impossible to freely select the various parameters, since there is a limited minimum thickness to be complied with for a silicon plate obtained from a silicon wafer. By way of example, silicon wafers are usually available with a thickness ranging from 0.3 to 0.5 mm that cannot be decreased to obtain wings or flaps having a thickness of approximately 10 to 15 μm . Below these values, it becomes very difficult to accurately control the end thickness.

Because of this constraint on minimum thicknesses, the designer of a micromagnetometer cannot freely independently select the various parameters such as the size of the vibrating wing (the wing span is unavoidably relatively large and the device needs a determined silicon surface), the resonance frequency, etc. More particularly, it is necessary to select systems that are resonant at frequencies of approximately 10 kilohertz, which does not permit to significantly reduce the parasitic mechanical vibrations. Additionally, the size of the wing does not allow to fully get rid of perturbations associated with accelerations which the system may withstand.

Thus, an object of the invention is to provide a new type of micromagnetometer.

Another object of the invention is to provide such a micromagnetometer in which the vibrating portion is as thin and as light as possible.

A further object of the invention is to provide such a micromagnetometer in which the vibrating portion occupies a surface as small as possible.

These objects are achieved by providing a micromagnetometer with capacitive detection including:

- two thin superposed conductive layers, separated by an insulating interface, and formed on an insulating substrate, at least the upper layer being etched so as to comprise a layer segment contacted at its ends by two parallel strips placed orthogonally to this segment, said segment and a portion of said strips as well as the portions corresponding to the lower layer forming a wing positioned above a recess of the substrate;
- a conductive surface formed in the substrate recess, at least in register with said segment;

- means for electrically connecting the upper layer to the two strips so as to connect a current source thereto; and

5 - means for measuring the capacity variations between the thin lower conductive layer and the conductive surface.

A process for manufacturing a micromagnetometer sensor element according to the invention includes the following steps:

10 - providing a substrate having an insulating upper surface including at least one conductive surface;

 - forming, more particularly above the conductive surface, a layer portion of a product that can be selectively etched with respect to the apparent surfaces of the substrate;

15 - forming above the substrate and the layer portion of a product that can be selectively etched a sandwich including:

 . a first conductive layer,
20 . an insulating layer,
 . a second conductive layer,

 - etching this sandwich so as to leave in place a first portion on the substrate and a second portion on the layer portion of a product that can be selectively etched, the second portion being formed so as to enable
25 the flow of a current in the upper conductive layer in a main direction, orthogonal to the field to be detected; and

 - removing by selective etching the layer portion
30 of a product that can be selectively etched, whereby the second portion extends above the conductive layer.

According to an embodiment of the present invention, the conductive layers are aluminum layers, and

the insulating layer is an alumina layer; the substrate is a silicon wafer coated with silicon oxide; and the conductive surface is a layer portion made of doped polycrystalline silicon.

5 According to an embodiment of the present invention, the product that can be selectively etched is made of polycrystalline silicon or is a resist layer.

10 Thus, the structure of the vibrating wing of a micromagnetometer according to the invention is particularly light since it is formed by only two thin metallization layers, for example, a sandwich constituted by two aluminum layers separated by an alumina layer. This very light vibrating structure has a high vibration frequency that can be, as indicated hereinafter, chosen by the designer. The designer will be able, more particularly, to select the size of the vibrating wing or the metal constituting the various conductive layers. By comparing a micromagnetometer according to the invention with a prior art micromagnetometer with silicon wings, it can be seen that the micromagnetometer according to the invention has a higher quality factor Q , that is, a higher sensitivity.

25 The foregoing and other objects, features and advantages of the invention will become apparent from the following detailed description of specific embodiments when taken in conjunction with the accompanying drawings, wherein:

Fig. 1 is a schematic cross-sectional view of a structure according to the present invention;

30 Fig. 2 is a schematic perspective view corresponding to Fig. 1;

Figs. 3A and 3B are transverse and longitudinal cross-sectional views, respectively, of a structure according to the present invention;

5 Figs. 4A, 4B and 4C schematically illustrate an aspect of the process according to the invention; and

Fig. 5 is an exemplary block diagram of a general electric circuit of a sensor according to the invention.

10 The principle of a micromagnetometer according to the invention will first be described with relation to the cross-sectional view of Fig. 1 and the perspective view of Fig. 2 that very schematically illustrate some aspects of the present invention.

15 According to an embodiment of the invention, there is provided a beam formed by a sandwich including a first conductive layer 1, an insulating layer 2 and a second conductive layer 3. A first portion of the sandwich lies on a substrate, and a second portion constituting the beam extends over this substrate. As represented in more detail in Fig. 2, the second portion includes, at least for the upper layer 3, a segment 4 oriented according to a first direction substantially parallel to the limit 5 of the substrate beyond which the second portion extends. Segment 4 is integral with
20 two strips 6 and 7 placed orthogonally to this segment and that extend over the substrate. In other words, strip 6, segment 4 and strip 7 constitute a portion of an electric turn allowing an electric current, for example an a.c. current, having a determined value to
25 flow through segment 4. Thus, depending on the intensity of a magnetic field B oriented perpendicularly to the main direction of segment 4, the beam formed by the overlying portion is deflected when the current is a
30

d.c. current, or oscillates when the current is an a.c. current (for example, at the mechanical resonance frequency of the beam).

5 In the example of Fig. 1, the substrate is formed by a silicon wafer 10 coated with a first silicon oxide layer 11, in turn coated with a second silicon layer 12 constituting a step beyond which the second portion of sandwich 1, 2, 3 extends. To detect the deflections or vibrations of segment 4, a conductive layer portion 14
10 is disposed substantially in register with segment 4, and the capacitance variation between the portion of layer 1 of segment 4 and the portion of layer 14 is conventionally detected, this capacitance being representative of the distance and distance variations
15 between these elements.

Figs. 3A and 3B are more detailed, although schematic, cross-sectional views drawn along planes A-A and B-B of Fig. 2 and illustrate an exemplary manufacturing mode of a sensor according to the invention.

20 As conventional in integrated circuit representation, it will be noted that in the various drawings the thicknesses and lateral sizes of the various layers are not drawn to scale but are arbitrarily enlarged or reduced in order to facilitate the legibility of the drawings. For the size of the various layers, prior art
25 standards should be referred to, unless specific values are otherwise indicated in the following description.

To manufacture a structure such as the structure illustrated in Figs. 3A and 3B, one starts from a silicon substrate 10 on which is formed, through thermal
30 oxidation and/or chemical vapor deposition, a silicon oxide layer 11. A polycrystalline silicon layer 14 (highly doped to be conductive) is deposited and etched

so as to face the oscillating segment to be subsequently formed. The whole surface, and more particularly the upper portion of the polycrystalline silicon layer, is coated with an insulating layer, for example silicon oxide 21. On this insulating layer is formed a polycrystalline silicon layer 22 that is etched to be positioned below the second portion of the above-mentioned sandwich that has to be overhanging. Then, there are successively formed: a first aluminum layer 1 (for example through vacuum sputtering), an alumina insulating layer 2 (for example through thermal oxidation), and a second aluminum layer 3 (also obtained through vacuum sputtering). The sandwich formed by the three layers 1, 2 and 3 is etched according to the desired pattern, for example according to the pattern shown in Fig. 2. Then, the polycrystalline silicon layer 22 is selectively etched with respect to the silicon oxide, aluminum and alumina, to provide the illustrated structure.

Of course, the successive above-described steps are only illustrative of an example of numerous possible methods for fabricating the structure according to the invention. More particularly, various steps of planarization can be provided to obtain a plane upper surface of layer 21 and so that the upper surface of the polycrystalline silicon layer 22 is prolonged on the same level by an oxide surface so that the upper surface of the beam is plane, as represented in Fig. 1. Thus, a conductor intended to compensate for the electric field to be measured and fixed to the micromagnetometer, can be provided below layers 1, 2 and 3.

Additionally, many variants are possible as regards the materials used. While silicon and silicon oxide are

presently the most frequently available materials, other analogous materials can be used. Moreover, instead of the doped polycrystalline silicon of layer 14, any other conductive material compatible with the manufacturing process can be used. Similarly, instead of two aluminum layers 1 and 3, layers of other metal or metal alloys, such as titanium or titanium-copper, can be used, provided that they have a sufficient strength to form an overhanging portion, and a satisfactory electrical conduction for the current intended to interact with the magnetic field B to provide a motion due to Laplace forces.

The main reason for which silicon substrate is presently preferred is illustrated in the right-hand portion of Fig. 3B. Indeed, the process described above is compatible with the simultaneous manufacturing of MOS transistors in the silicon wafer 10. As will be apparent to those skilled in the art, the gate 25 of such a MOS transistor can be formed during the same step as the conductive plate 14.

Additionally, although not represented in the various drawings for the sake of simplicity, it should be clear that the various conductive layers extend to other layers or to pads to ensure the required connections, one of the end manufacturing steps consisting in forming contacts with the above mentioned pads.

Figs. 4A, 4B, 4C more generally illustrate the formation of an overhanging beam according to the invention. As represented in Fig. 4A, on a substrate 30 is formed a layer 31 of a product that can be selectively etched, layer 31 being coated with thin layers 32 of the material(s) intended to constitute the beam. Then, at the step illustrated in Fig. 4B, the beam is etched

in the desired pattern; last, as illustrated at the step shown in Fig. 4C, the selectively etchable product 31 is eliminated.

5 The use of polycrystalline silicon has been suggested to serve as a selectively etchable material. In some applications, it may be simpler to use a resist layer.

10 If l is the length of strips 6 and 7 disposed orthogonally to segment 4 (refer to Fig. 2), L is the width of these strips and the width of segment 4, L_0 is the total length of segment 4, and e is the total thickness of the sandwich including elements 1, 2 and 3, one obtains with a structure of the type illustrated in Fig. 2, where $e = 2 \mu\text{m}$:

- 15 - a 160 kHz resonance frequency
with $L = 30 \mu\text{m}$, $l = 60 \mu\text{m}$, $L_0 = 120 \mu\text{m}$,
(an 1-g acceleration corresponding to a 1.5 nT magnetic field, whereas this acceleration would correspond to 10^3 nT for a comparable
20 micromagnetometer having a silicon vibrating wing);
- a 1.4 MHz resonance frequency
with $L = 20 \mu\text{m}$, $l = 10 \mu\text{m}$, $L_0 = 40 \mu\text{m}$.

25 An advantage of the present invention, more particularly due to the small mass of the beam, is the possibility to obtain such high resonance frequencies that allow to get rid of parasitic vibrations or accelerations usually occurring in mechanical systems, and to decrease the noise reversely proportional to the frequency of the detection electronic system.

30 Additionally, as is desirable for a satisfactory detectivity, with the manufacturing process according to the invention, it is possible to obtain a distance between the two electrode wafers 4 and 14 that allows

the detection of vibrations of the beam according to the invention having very low amplitudes. This small distance provides a capacitor with a measurable value even for small dimensions of the beam according to the invention. However, a drawback is that the air included between the beam and the electrode wafer of the substrate tends to dampen vibrations. To avoid this effect, a structure according to the invention will be preferably mounted in an evacuated case.

Fig. 5 schematically illustrates the circuit arrangement of a sensor according to the invention. In the drawing of Fig. 5, the turn or segment portion of the upper layer 3 in which flows current i intended to interact with the magnetic field applied to bow or oscillate the structure is labelled 40. The portion of the lower layer 1 of segment 4 constitutes a first plate, connected to ground, of a capacitor 41 whose second plate corresponds to the conductive surface 14. This second plate is connected to a biasing voltage source VCC through two head to tail diodes 42 and 43. This second plate is also connected to the gate of a MOS transistor 44, normally a transistor formed in the same structure, as shown in the right-hand portion of Fig. 3B. The biasing circuit including two head to tail connected diodes allows for the polarization of the gate of transistor 44 at the value of voltage VCC.

The output signal amplified by the MOS transistor 44 is still amplified by a high frequency amplifier 45 acting through a servocontrol circuit 46 and a MOS transistor 47 that is connected in series with turn 40 to control the current in turn 40 to the resonance frequency of the beam (maximum value of the output signal). Additionally, a compensation conductor 50 can be

11

provided, disposed for example on the above substrate, and controlled by a synchronous demodulator 51 and a control circuit 48 to maintain at a very low value the oscillation of the sensor according to the invention and to improve the linearity of the measurements.

As is apparent to those skilled in the art, various modifications can be made to the above disclosed preferred embodiments, more particularly for the choice of the materials to be used. Various manufacturing methods can be chosen amongst the conventional methods in the field of integrated circuit manufacturing.

Additionally, the vibrating beam can have various shapes. For example, the lower conductive layer that serves as a capacitor plate will not necessarily have the same shape as the upper conductive layer in which flows a current interacting with a magnetic field. The beam can also be coated with an insulating material, such as SiO_2 . Also, two symmetrical structures can be coupled so as to eliminate some parasitic effects.

CLAIMS

1. A capacitive detection micromagnetometer including:

- 5 - two thin superposed conductive layers (1, 3), separated by an insulating interface (2) and formed on an insulating substrate, at least the upper layer (3) being etched so as to comprise a layer segment (4) contacted at its ends by two parallel strips (6, 7) placed orthogonally to this segment, said segment and a portion of the strips as well as the portions corresponding to the lower layer forming a wing positioned above a recess of said substrate;
- 10 - a conductive surface (14) formed in the substrate recess, at least in register with said segment;
- 15 - means for electrically connecting the upper layer to said two strips (6, 7) so as to connect a current source thereto; and
- 20 - means for measuring the capacity variations between the thin lower conductive layer (1) and the conductive surface (14).

2. The micromagnetometer of claim 1, wherein the widths of said thin layers (1, 3) are within the range of approximately 0.1 micrometer to a few micrometers, and wherein said segment (4) has a length within a range of approximately a few tens to a few hundred of a micrometer, and wherein the portions that are extending beyond said strips have lengths and widths of approximately 10 μm .

3. A process for manufacturing a micromagnetometer sensor element including the steps of:

- providing a substrate having an insulating upper surface (10, 11, 21, 30) including at least one conductive surface (14);

5 - forming, more particularly above the conductive surface (14), a layer portion (22; 31) of a product that can be selectively etched with respect to the apparent surfaces of the substrate;

10 - forming above the substrate and said layer portion of a product that can be selectively etched (22; 31) a sandwich including:

- . a first conductive layer (1),
- . an insulating layer (2),
- . a second conductive layer (3);

15 - etching said sandwich so as to leave in place a first portion on the substrate and a second portion on said layer portion of a product that can be selectively etched (22; 31), said second portion being formed so as to enable the flow of a current in the upper conductive layer (3) in a main direction, orthogonal to the field
20 to be detected; and

 - removing by selective etching said layer portion of a product that can be selectively etched (22; 31), whereby the second portion extends above said conductive layer (14).

25 4. The process of claim 3, wherein said conductive layers (1, 3) are aluminum layers and the insulating layer (2) is an alumina layer.

 5. The process of claim 3, wherein the substrate is a silicon wafer (10) coated with silicon oxide (11).

30 6. The process of claim 5, wherein the conductive surface (14) is a layer portion made of doped polycrystalline silicon.

7. The process of claim 6, wherein the product that can be selectively etched is made of polycrystalline silicon, the polycrystalline silicon layer (14), according to claim 6, being in turn previously coated
5 with silicon oxide (21).

8. The process of claim 3, wherein the layer of the product that can be selectively etched (22; 31) is a resist layer.

1/4

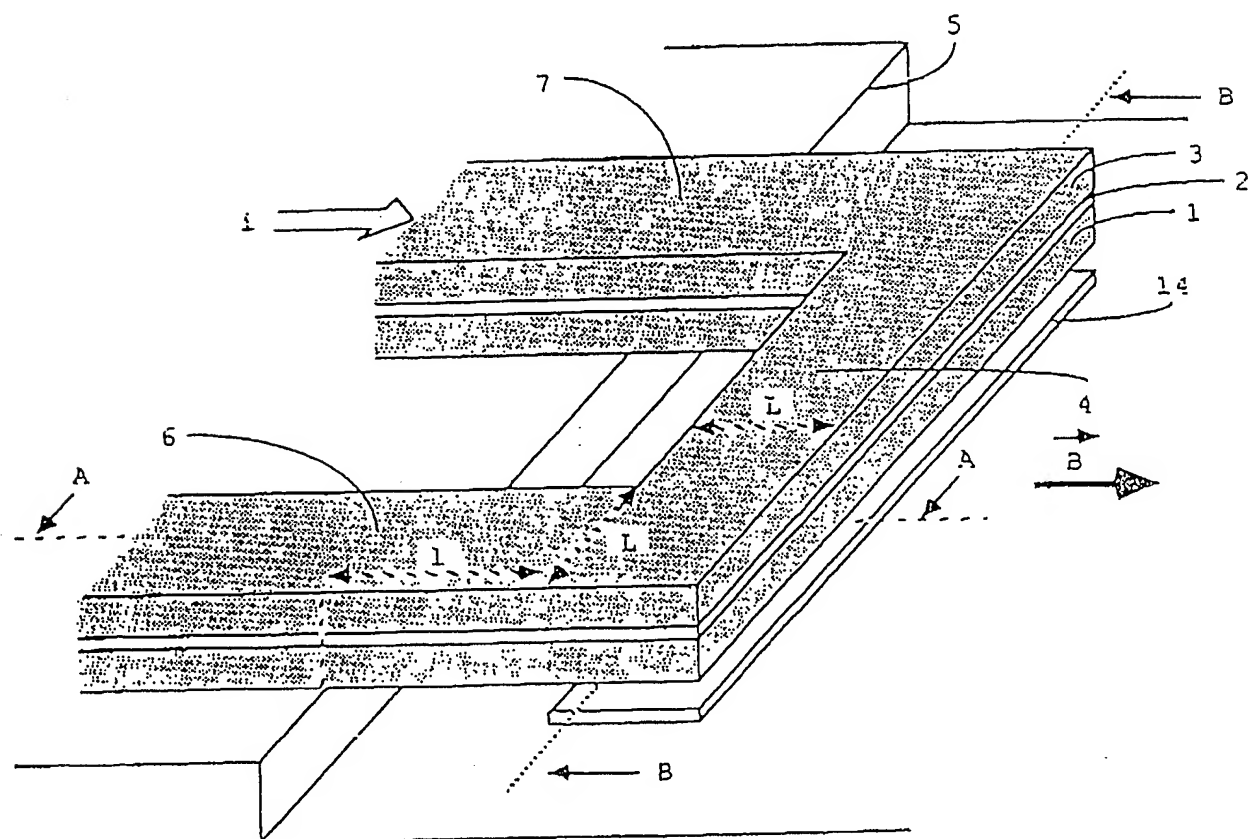
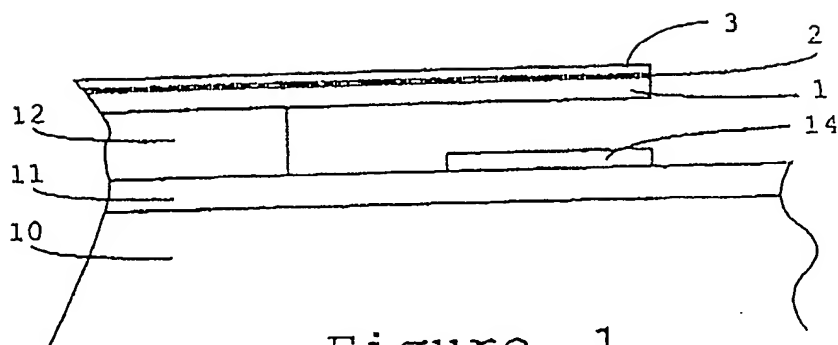


Figure 2

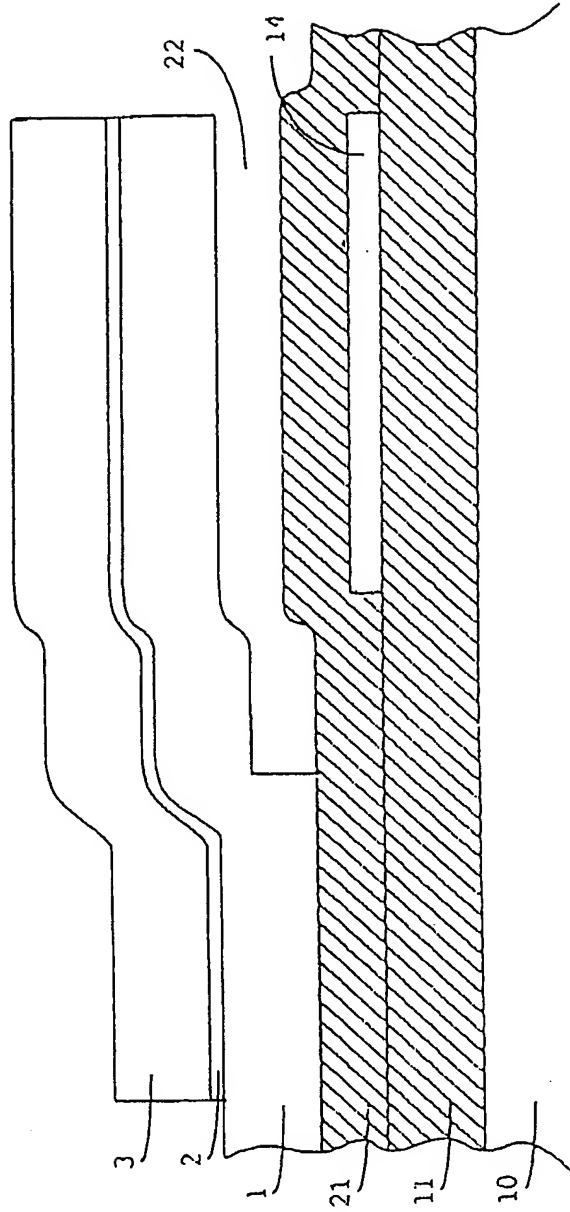


Figure 3A

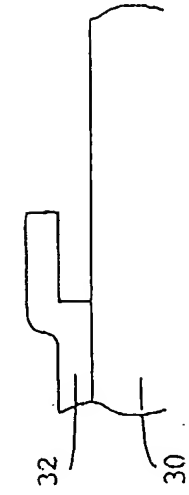


Figure 4C

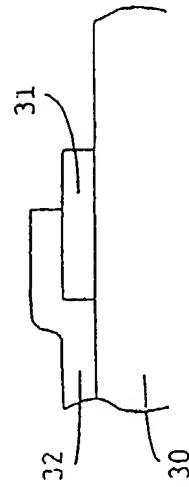


Figure 4B



Figure 4A

3/4

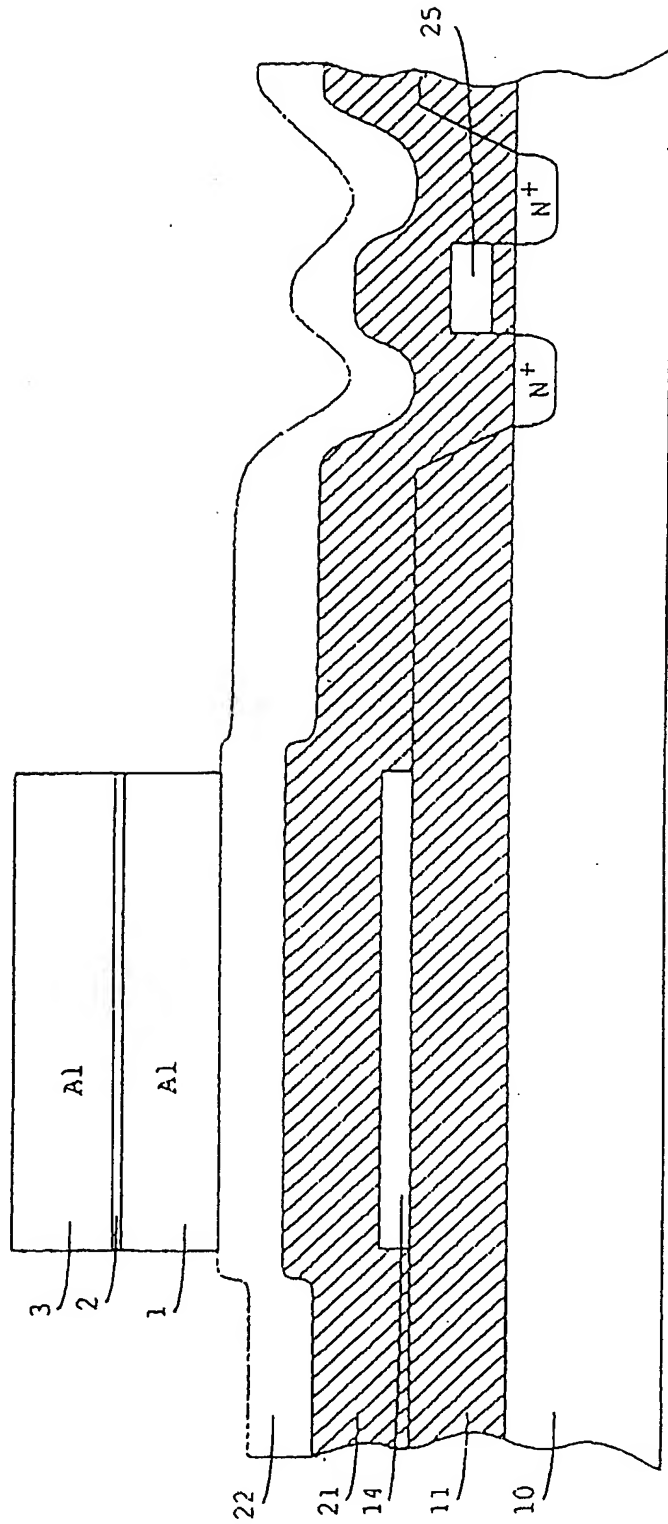


Figure 3B

4/4

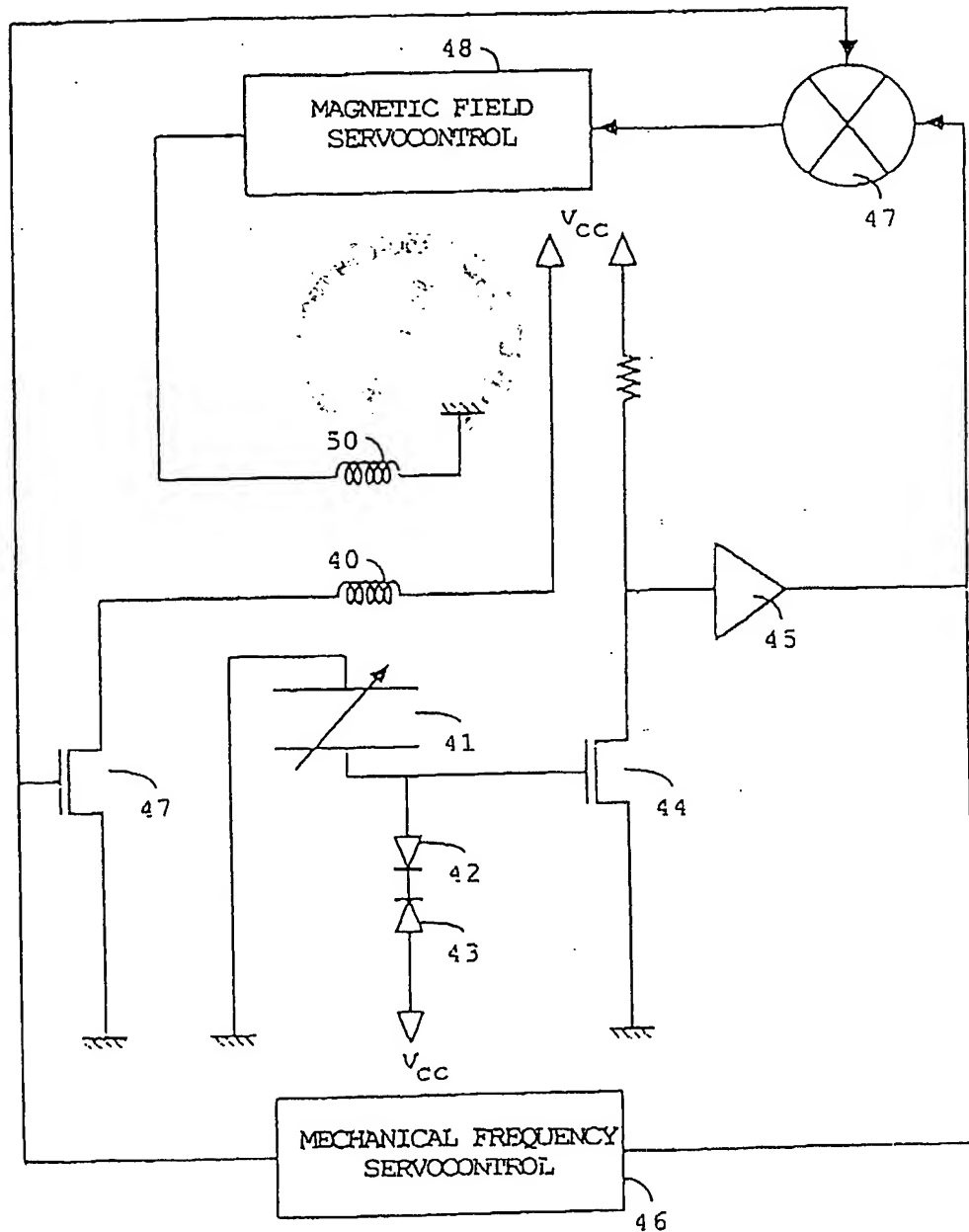


Figure 5